

2020年10月13日
京大 KUCA ヒアリング資料

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

添付10の解析について

今回の原子炉設置申請書の変更申請では、これまで使用している高濃縮燃料に加えて、新しく低濃縮燃料を追加することとなる。現行の申請書における添付10では、高濃縮燃料を対象とした過渡解析、事故解析を実施しており、新規制基準の下、2016年5月に原子力規制委員会よりご承認を頂いている。低濃縮燃料については、軽水減速架台では燃料の組成をウランアルミニウム合金からウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料に変更するが燃料の形状は全く変更無し、固体減速炉心では燃料の組成がウランアルミニウム合金からウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料に変更し、形状はアルミニウム被覆で覆われて厚さが変更になる程度であり、炉心の核的制限値、熱的制限値、最大出力等の規制値、および制御設備、核計装系等の設備や減速材は変更していない。

なお、申請書の添付8の審査において、本臨界実験装置の低濃縮燃料使用時の運転条件が、高濃縮燃料使用時よりもさらに保守的に絞られているため、2019年5月に申請した内容から一部過渡解析を実施しない項目がある。

1. 運転時の異常な過渡変化

「通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって、当該状態が継続した場合には試験研究用等原子炉の炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」

1-1 解析項目

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化
 - (i) 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

- (iii) 実験物の異常等による反応度の付加
- (2) 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
 - (i) 商用電源喪失
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
 - (i) 重水反射体への軽水流入
(ただし、これまでの審査会合での説明のなかで低濃縮燃料を用いた炉心では重水タンクを使用しないとしているので、この項目については追加の記載は行わない) (2019年5月に提出した設置変更承認申請書からの変更なので、補正申請で対応)
 - (ii) その他原子炉施設の設計により必要と認められる異常
 - a. 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 - b. 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

判定基準は以下の通りである。

- (i) 燃料の最高温度は 400°C を超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は 400°C を超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材である黒鉛及びポリエチレンの最高温度は 100°C を超えないこと。(ただし、低濃縮燃料を用いた炉心では黒鉛を燃料セル部で使用しないとしているので、追加の記載は行わない)
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は 100°C 未満であること。

1-2 解析条件

1-2-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

原子炉起動時に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起これ、原子炉出力が急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- ・炉周期が 30 秒以下になればインターロックにより制御棒の引抜きは制限されると共に警報が発報し運転員に異常を知らせる。
- ・炉周期が 15 秒以下、または出力が線型出力計の各レンジの 110%以上になると一せい挿入（制御棒 3 本のモータによる自動挿入）が作動すると共に警報が発報し運転員に異常を知らせる。
- ・炉周期が 10 秒以下、または出力が線型出力計の各レンジの 120%以上、若しくは安全出力計の指示値が 120%以上になればスクラムが作動し、自動的に 6 本全ての制

御棒を保持している電磁石の励磁電流が遮断され自重により炉心に挿入され、同時に固体減速炉心では中心架台を保持している油圧ポンプが停止して中心架台が落下、軽水減速炉心ではダンプ弁を保持している電磁石の励磁電流が遮断され弁座が下降し炉心タンク内の水が排水される。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付書類 8 で選定したすべての代表炉心とする。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は $0.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5 \% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は $1.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5 \% \Delta k/k$

制御棒反応度添加率は核的制限値の最大値

$0.02 \% \Delta k/k/s$

軽水ダンプまたは中心架台落下による反応度は核的制限値の最小値

$1 \% \Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力系は指示値が 100% で 1W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数が負の炉心については温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。反応度温度係数が正の炉心（軽水減速炉心の一部の 2 分割炉心）については温度変化に伴う反応度フィードバックを考慮するが、反応度温度係数は核的制限値の最大値の $+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^{\circ}\text{C}$ であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わる。

2019 年 6 月 17 日の審査会合以降に「負の温度係数をゼロとしていることに

ついて、この仮定によりスクラム（出力高）がより早くかかって、結果的に燃料や減速材の温度上昇を過小評価しているのではないか。実際の負の温度係数を前提とした評価結果について説明すること。」とのコメントがあり、2019年7月11日のヒアリング資料において「負の温度係数を考慮することによりスクラム信号が発報するまでの時間は若干遅くなっているが、炉心の温度上昇の値については有効数字3桁では変化は見られなかった。従って負の温度係数を持つ炉心について温度係数をゼロとして過渡解析を行っても問題は無い。」と回答している。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期15秒以下の一せい挿入信号、および炉周期10秒以下のスクラム信号は発生しない。
- ・線型出力計の指示値が110%を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が1秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の1秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒1本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・スクラム信号の発生でも中心架台は落下せず、ダンプ弁は開かない。

(6) スクラム信号発生

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率（ $0.02\% \Delta k/k/s$ ）で反応度が連続的に投入される。
- ・線型出力計の指示値が120%（出力が1.2W）を超えたときにスクラム信号が発生する。

(7) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布がcos分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

出力運転中に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力の急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1)解析対象炉心、(2) 反応度等、(4)反応度温度係数、(5) 安全保護回路系等の動作、(7)評価

については「1-2-1」と同じ。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 100W の臨界状態

(5) スクラム信号発生

- ・制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率 (0.02%Δk/k/s) で反応度が連続的に投入される。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が発生する。安全出力計の指示値も 120%を越えて、同時にスクラム信号が発生する。

1-2-3 実験物の異常等による反応度の付加

原子炉の出力運転中に、炉心に直接挿入又は燃料集合体に取り付けて炉心内挿入する実験物の位置が変化した場合、炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1)解析対象炉心、(2) 反応度等、(4)反応度温度係数、(5) 安全保護回路系等の動作、(7) 評価

については「1-2-1」と同じ。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

(6) スクラム信号発生

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、申請書に記載された実験物の最大反応度 ($+0.5\% \Delta k/k$) がステップ状に加わる。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が発生する。安全出力計の指示値も 120%を越えて、同時にスクラム信号が発生する。

1-2-4 商用電源喪失

原子炉の出力運転中に電力系統の故障又は所内電気設備の故障等により商用電源が喪失すれば、安全保護回路系の電源断により原子炉はスクラムして停止するため、その後の運転状況の監視を行う必要はないとしているが、それを確認するために評価を行う

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする [マスク] [マスク] 臨界量が少ない炉心のほうが発熱密度が最も高くなって、燃料温度の評価が厳しくなるためである。

(添付 8 の代表炉心については補正申請で修正)

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は $0.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5 \% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は $1.35 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値 (全体の 1/3 以下) の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45 \% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5 \% \Delta k/k$

軽水ダンプまたは中心架台落下による反応度は核的制限値の最小値

$1\% \Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水出力 100W の臨界状態で 1 時間運転 (1 ヶ月の最大積算出力 100Wh までの運転)

(4) 反応度温度係数

温度変化に伴う反応度フィードバックは考慮しない。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・ 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により制御棒が落下。ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できないとする。
- ・ 商用電源喪失から 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ 固体減速炉心では商用電源喪失に伴い中心架台を保持している油圧ポンプが停止して中心架台が落下し、12 秒後 (申請書の記載値) にステップ状の負の反応度が加わる。
- ・ 軽水減速炉心では商用電源喪失に伴いダンプ弁を保持している電磁石電源断により弁座が下降し水が排水され、30 秒後 (申請書の記載値) にステップ状の負の反応度が加わる。

(6) 評価

- ・ 商用電源喪失後の 1 時間後までの積算熱量 (主に核分裂生成物の崩壊熱) を求める。
- ・ 発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-5 重水反射体への軽水流入

軽水減速架台において重水タンクを使用して出力運転中に重水タンクが破損した場合、重水反射体へ軽水が流入すること、又は軽水に重水が流入することにより炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇する可能性がある。

高濃縮ウラン燃料の炉心ではこの解析項目があるが、低濃縮燃料を用いた炉心では重水タンクを使用しないとしているので、追加の記載は行わない。

1-2-6 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用

固体減速架台の A 架台において、中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置は未臨界状態でのみ使用することが定められているが、臨界状態で使用した場合には出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付書類 8 で選定したすべての代表炉心とする。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、 $0.35\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、 $1.35\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の $1/3$ 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限

線型出力系は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数はすべて負であるので、温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(5) 中性子発生設備の状態と安全保護回路系等の動作

- ・ 臨界状態でパルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量はパルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10}\text{n/s}$ 、中性子発生設備については 10^{11}n/s であるので、この解析では値の大きい 10^{11}n/s で中性子を打ち込むものとする。
- ・ 線型出力計の指示値が 110% を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・ 線型出力計の指示値が 120% （出力が 1.2W ）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・ スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・ スクラム信号の発生でも中心架台は落下しない。

(6) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

1-2-7 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させるとき、反応度温度係数が正の炉心の場合には炉心温度の上昇に伴って正の反応度が印加され出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、軽水減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で最も正の反応度温度係数が大きな炉心 (C45G(6H₂O)炉心) とする。

(添付 8 の代表炉心については補正申請で修正)

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、0.5 % $\Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.5 % $\Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値 (全体の 1/3 以下) の最大値

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5$ % $\Delta k/k$

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 100W の臨界状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数は核的制限値の最大値の $+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わる。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・ [] [] 用いて炉心タンク水の温度を上昇させる。
ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- ・ 線型出力計の指示値が 110% を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・ 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超えたときにスクラム信号が

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

発生する。

- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が1秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生の1秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒1本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・スクラム信号の発生でもダンプ弁は開放されない。

(6) 評価

スクラムが発生するまでの時間、積算発熱量を求め、発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

2. 設計基準事故

「発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には試験研究用等原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」

2-1 解析項目

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 反応度の異常な投入
 - (i) 燃料落下又は燃料誤装荷
- (2) 環境への放射性物質の異常な放出
 - (i) 燃料の機械的破損
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷

判定基準は運転時の異常な過渡変化の解析での判定基準 (i) ~ (iv) に以下の項目を加える。

- (v) 周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えないこと。

2-2 解析条件

2-2-1 燃料落下又は燃料誤装荷

炉心配置変更の際に燃料集合体を計画外の位置に誤って装荷した場合、炉心に反応度が投入され原子炉出力が上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で各燃料セルの炉心のうち燃料体 1 本当当たりの反応度の大きな炉心長が約 50cm の炉心とする。すなわち、L5.5P-50、L4P-50、L3P-50、L2P-50、L1P-50、LL1P-50 の 6 炉心とする。

(添付 8 の代表炉心については補正申請で修正)

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、 $0.35\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、 $1.35\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の $1/3$ 以下）の最大値

固体減速炉心は $1.35 \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

中心架台の反応度は $5\% \Delta k/k$ 、または $10\% \Delta k/k$ の 2 ケース

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

6 本ある制御棒のうち 3 本は全引抜き、残りの 3 本は全挿入とし、中心架台を下限

線型出力系は指示値が 100% で 0.1W となるレンジ

中性子源を挿入して、出力 0.01W の未臨界定常状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数はすべて負であるので、温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(5) 安全保護回路系等の動作

- ・誤ってこの炉心用の燃料集合体をもう 1 体作成してしまい、炉心のポリエチレン反射体を取り出して、その位置に追加の燃料集合体を装荷したとする。燃料集合体の装荷位置は 1 体当たりの反応度が最も大きい位置とする。
- ・中心架台を上昇させる。上昇速度は申請書に記載した制限値の最大速度とする。
- ・対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期系からの信号では安全保護回路系が作動しない。
- ・線型出力計の指示値が 110% を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・線型出力計の指示値が 120%（出力が 0.12W ）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・スクラム信号の発生に伴い中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。
- ・スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・中心架台はスクラム信号発生後の 1 秒後に落下を開始し、スクラム信号発生後の 12 秒後までに時間とともに線型に負の反応度を加えるとする。

(6) 評価

スクラムが発生するまでの時間、積算発熱量を求め、発生した熱は全て燃料

の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が \cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。

2-2-2 燃料の機械的破損

燃料集合体の製作、運搬、炉心装荷作業などの取扱中に誤って燃料集合体を落下させるなどした場合、燃料集合体が機械的に破損して燃料要素より核分裂生成物が放出され周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを与える可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする（固体減速炉心：L4P-30、軽水減速炉心：C45G0(5 列)）。

(2) 初期条件

同じ炉心で月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを 9 回繰り返すとする。各運転間隔は 30 日間とし、その後、最後の運転の 24 時間後（次の月の初日）に 100W での運転を 1 時間行う。（申請書に記載された積算出力に関する規制値は、100Wh/月、1kW/年）

(3) 燃料破損条件

最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行い、その際に 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を破損させたとする。

軽水減速架台では 1 枚の燃料を破損させ、燃料芯材において

固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料板

が折れ曲がり、燃料板の切断面から

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

2-2-3 実験設備、実験物等の著しい損傷

パイルオシレータで核燃料の試料を用いているときに、核燃料が何らかの原因により損傷した場合、試料より核分裂生成物が放出される可能性がある。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の添付 8 の代表炉心の中で最も臨界量の少ない炉心とする [REDACTED]

(2) 初期条件

- ・最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン（4.5%濃縮）の試料の反応度測定を行う。
- ・各試料の量はパイルオシレータ実験での反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$ であるとする。

(3) 実験物破損条件

最大積算出力となる運転を終了直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物（希ガス（Xe、Kr）及びよう素）の 10%が放出されたとする。

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

3. 解析方法

解析は遅発中性子 6 群の 1 点炉動特性方程式を解くことにより行う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot N(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + S$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{f_i \beta}{\ell} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i=1 \sim 6)$$

ここで、

- $\rho(t)$: 時刻 t における反応度
- $N(t)$: 時刻 t における原子炉出力レベル
- ℓ : 中性子寿命
- β : 実効遅発中性子割合
- S : 中性子源強度
- f_i : グループ i に属する遅発中性子の割合
- λ_i : グループ i に属する連発遅発中性子先行核の崩壊定数
- $C_i(t)$: グループ i に属する遅発中性子先行核密度

この連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica®を用いて解いた。Mathematica は 25 年以上にわたり世界各国で使用されている数式処理システムで、微分積分等の様々な数式を解析的または数値的に解くことができる。

このシステムの計算精度を確認するために、軽水減速架台の C35G0(5 列)炉心において臨界状態からステップ状に正の反応度が印加された場合の安定ペリオドを求め、通常の逆時間方程式に基づいて得られる安定ペリオドとの比較を行った。Mathematica の計算では (10-1-1)、(10-1-2)式の連立微分方程式を数値的に解いて出力を求め、出力変化の形状を指数関数にフィッティングして安定ペリオドを算出した。

結果を表 1 に示す。両者は非常によく一致していることが判る。

また、設計基準事故の「燃料の機械的破損」等の解析においては燃焼に伴う核分裂生成物の発生量、燃料板中の核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価が必要となる。燃料の燃焼計算は米国の Oak Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-23)の解析時点で入手可能な最新版である ORIGEN-2.2 を使用し、断面積ライブラリとしては本原子炉施設の炉心の中性子エネルギースペクトルに比較的近い熱中性子炉の PWR 用に作成された定数 (PWRU.LIB) を用いた。

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

第1表 安定ペリオドの計算結果の比較 (C35G0(5列)炉心)

印加反応度 (% $\Delta k/k$)	(A) 逆時間方程式 (s)	(B) Mathematica (s)	(A) / (B)
0.1	69.31	69.24	1.001
0.3	10.48	10.48	1.000
0.5	2.475	2.476	0.999

【補足-A】

KUCA の制御設備、核計装設備について

1) KUCA の制御設備は以下の通りである。

- ① 制御棒 6 本（制御棒駆動装置（図 A-1）は固体減速炉心、軽水減速炉心で共通）
 - ・制御棒本体（吸収体）はそのヘッドを制御棒駆動用電磁石に吸着させ、制御用モーターで電磁石電源を上下させる
 - ・駆動速度は上下動作共に一定（0.5m /分 以下）
 - ・通常運転時は 3 本（S4～S6）を上限とし、残り 3 本（C1～C3）の挿入位置を調整する
 - ・スクラム信号発生時に電磁石電源を切って全ての制御棒を落下させる。スクラム信号発生から全挿入までの時間は 1 秒以下

- ② 中心架台（固体減速炉心）（図 A-2）
 - ・A 架台では 3 行×3 列、B 架台では 5 行×5 列
 - ・下方から油圧ポンプにより油圧をかけることで上昇させる。上昇途中でストップが 3 箇所があり、各ストップを通過するごとに上昇速度が遅くなる（表 A-1）。
 - ・炉心の他の集合体と同じ高さになったところ（中心架台上限）で停止し、油圧ポンプを駆動させ続けて上限を維持する。
 - ・スクラム信号発生時に油圧ポンプの電源を切って下降させる。上限から 105cm 落下するまで 12 秒以下
 - ・中心架台が上限にないと C1～C3 の制御棒は上昇できない

- ③ ダンプ弁（軽水減速炉心）（図 A-3 の⑮）
 - ・炉心タンク下部の配管に取り付けてある
 - ・空気圧で弁座を持ち上げて電磁石で固定することで閉止状態とする
 - ・スクラム信号発生時に電磁石電源を切って弁座を下降させることで炉心タンク水を排水する。燃料が完全に露出するまでの排水時間は 30 秒以下
 - ・ダンプ弁を閉止しないと C1～C3 の制御棒は上昇できない

2) 運転手順は以下の通りである。

① 固体減速炉心

[Redacted text block for Solid Moderator Core]

② 軽水減速炉心

[Redacted text block for Light Water Moderator Core]

3) KUCA の核計装系は以下の通りである。

① 起動系

- ・ 3本の核分裂計数管 FC #1~FC#3
- ・ FC #1~FC#3 の数値は制御室核計装盤 (図 A-7) の記録計とメータに表示される (範囲は $10^0 \sim 10^6$ cps)
- ・ 起動系の1系統以上の計数率が 2cps を越えないと制御棒、中心架台の上昇操作はできない

- ・ 起動系の計数率の炉周期を求め、3系統中2系統以上が炉周期短 (35秒以下) の信号を出したときには、制御棒引抜き阻止 (6本全ての制御棒)、中心架台上昇油圧ポンプ停止、炉心タンク給水ポンプ停止
- ・ ある程度出力が上昇したときにもこの炉周期短のインターロックは働くが、高出力では検出器の不感時間の影響で機能しない
- ・ 通常運転時には運転員が起動系の信号を意識することは無い

② 線型出力計系 (Lin-N)

a) 概要

- ・ ガンマ線非補償型電離箱 UIC #5
- ・ UIC #5 の数値は制御室核計装盤 (図 A-7) の記録計とメータ、制御卓の記録計とデジタル表示器 (図 A-6) に表示される (範囲は 0~120%) (制御卓の記録計と表示器は自主設置)
- ・ 線型出力計の数値は電離箱からの信号の電流値で表示され、表示の電流値が 100%で 3pA から $1 \mu A$ となる 12レンジを制御卓で切り替える (図 A-5)。
- ・ 上のレンジに変更することはいつでも可能であるが、下のレンジへの変更は指示値が 25%以下のときにのみ可能 (オーバースケールによるスクラムを防ぐため)
- ・ UIC #5 は設置位置により $1 \mu A$ 指示値で出力 100W 以下となるように設置している

b) 安全保護

- ・ 線型出力計の各レンジにおいて指示値が 90%を越えるとアラームが鳴る (図 A-5 の ALARM、これは自主警報)
- ・ 線型出力計の各レンジにおいて指示値が 110%を越えると一せい挿入信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、臨界調整用の3本の制御棒 (C1~C3) の駆動モータが自動的に動作して電磁石電源が入った状態で制御棒を炉心に挿入する

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

- ・線型出力計の各レンジにおいて指示値が 120%を越えるとスクラム信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される

c) 運転時の操作

- ・起動前点検の核計装設備の機能点検を行うとレンジは自動的に 300pA になる。また起動前点検の最後の段階でレンジを 3pA に変更する項目がある。
- ・運転員は線型出力計の指示値を見ながら運転を行う。通常、起動時の中性子源を挿入したのみのときは [REDACTED]
- ・運転時には運転員は線型出力計の指示値が約 20~70%の範囲内になるようにレンジを切り替えて出力を表示させる。(運転マニュアルである保安指示書には「線型出力計の指示値が各レンジの 70%を超過しないことを目安にして出力レンジを切り替え、目的の出力まで近づける。」と記載)
- ・運転時の出力確認には制御卓に指示値が表示された炉室内ガンマ線エリアモニタも参考にしており [REDACTED]

③ 対数出力炉周期系 (Log-N)

a) 概要

- ・ガンマ線非補償型電離箱 UIC #4
- ・UIC #4 の数値 (対数指示値、炉周期) は制御室核計装盤 (図 A-7) の記録計とメータ、制御卓のデジタル表示器 (図 A-6) に表示される (対数指示値は電離箱からの電流値 : $10^{-12}\text{A} \sim 10^{-5}\text{A}$)

b) 安全保護

- ・炉周期が 30 秒以下となるとアラームが鳴り、制御棒引抜き阻止 (6 本全ての制御棒)、中心架台上昇油圧ポンプ停止、炉心タンク給水ポンプ停止
- ・炉周期が 15 秒以下となると一せい挿入信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、臨界調整用の 3 本の制御棒 (C1~C3) の駆動モータが自動的に動作して電磁石電源は入った状態で制御棒を炉心に挿入する
- ・炉周期が 10 秒以下となるとスクラム信号を発生し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される

c) 運転時の操作

- ・運転員は炉周期が 30 秒以下にならないように指示値を見ながら運転を行う (50 秒以上くらいを目安)
- ・運転員は対数出力計の表示を見ながら運転することはほとんど無く、参考として見る程度

④ 安全出力系

a) 概要

- ・ガンマ線非補償型電離箱 UIC #6
- ・UIC #6 の数値はフルスケール 120%の制御室核計装盤（図 A-7）のメータにのみ表示され、レンジ切り替えは無し。
- ・UIC #6 は設置位置により 100%指示値で出力 100W 以下となるように設置している
[REDACTED]
- ・通常運転時には運転員が安全出力計の信号を意識することは無い

b) 安全保護

- ・指示値が 120%となるとスクラム信号を発し、アラームが鳴り制御卓に警報ランプが表示され、制御棒を吊っている電磁石電源が切断されて自重で炉心に挿入される

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

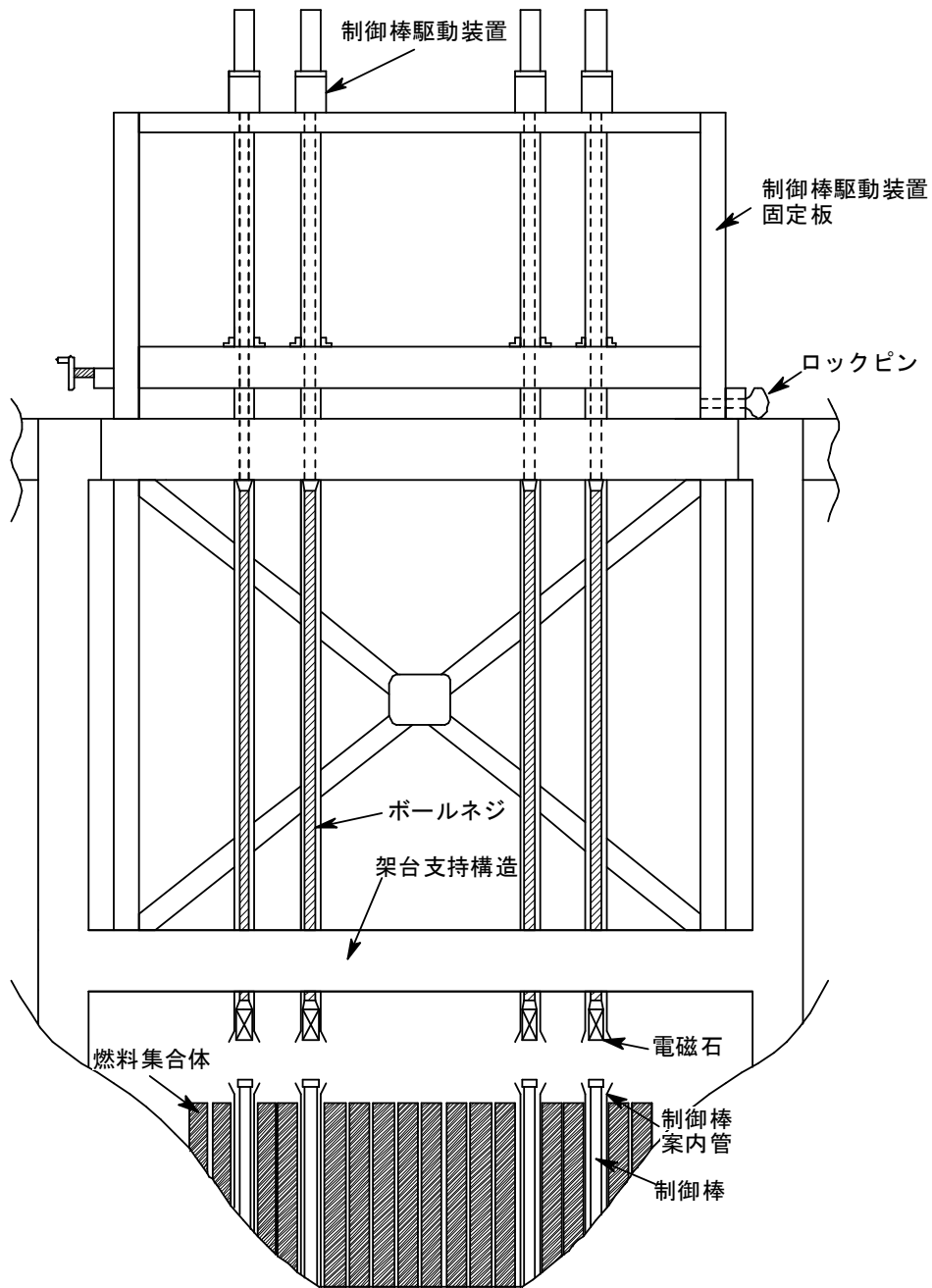


図 A-1 制御棒駆動装置

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

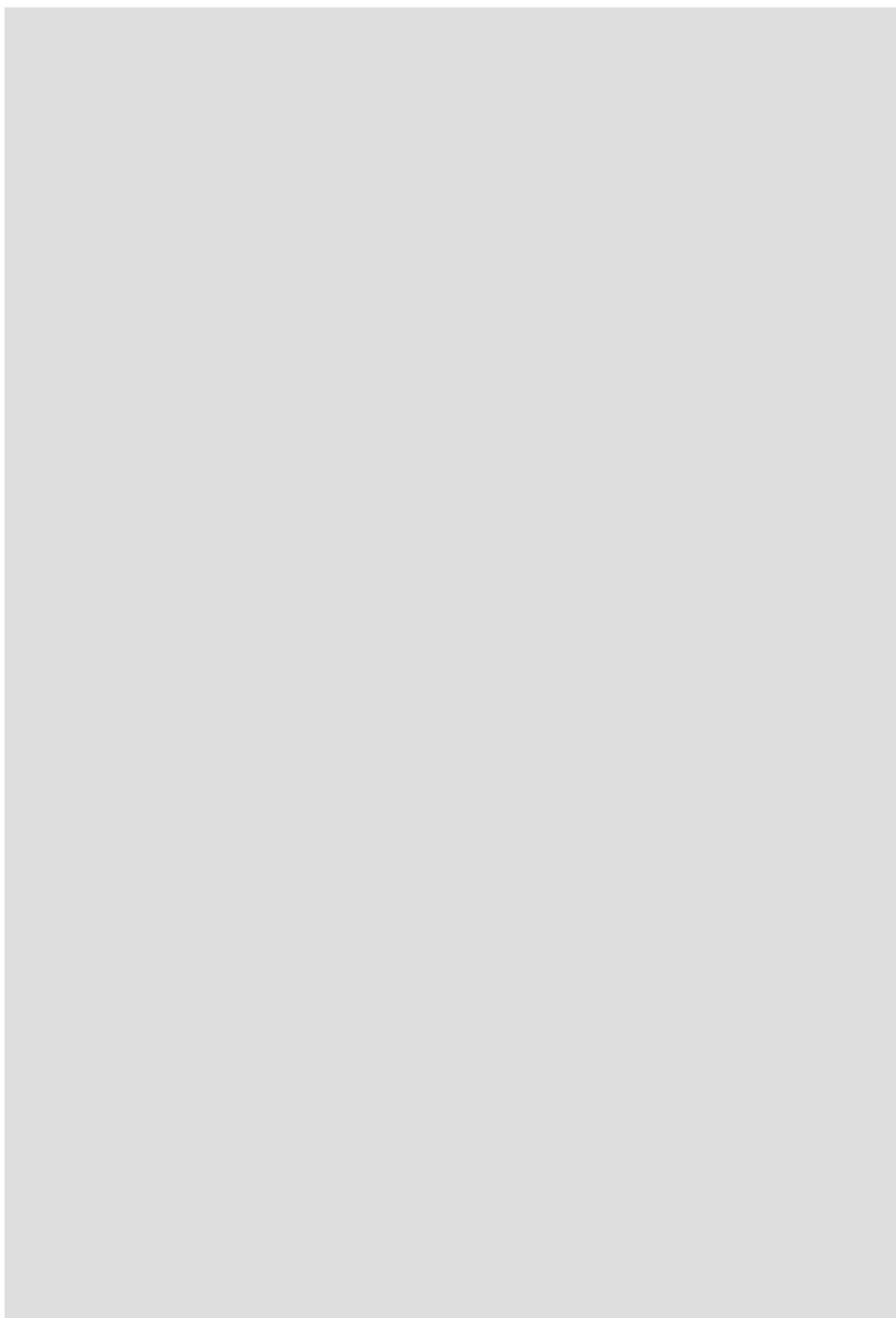
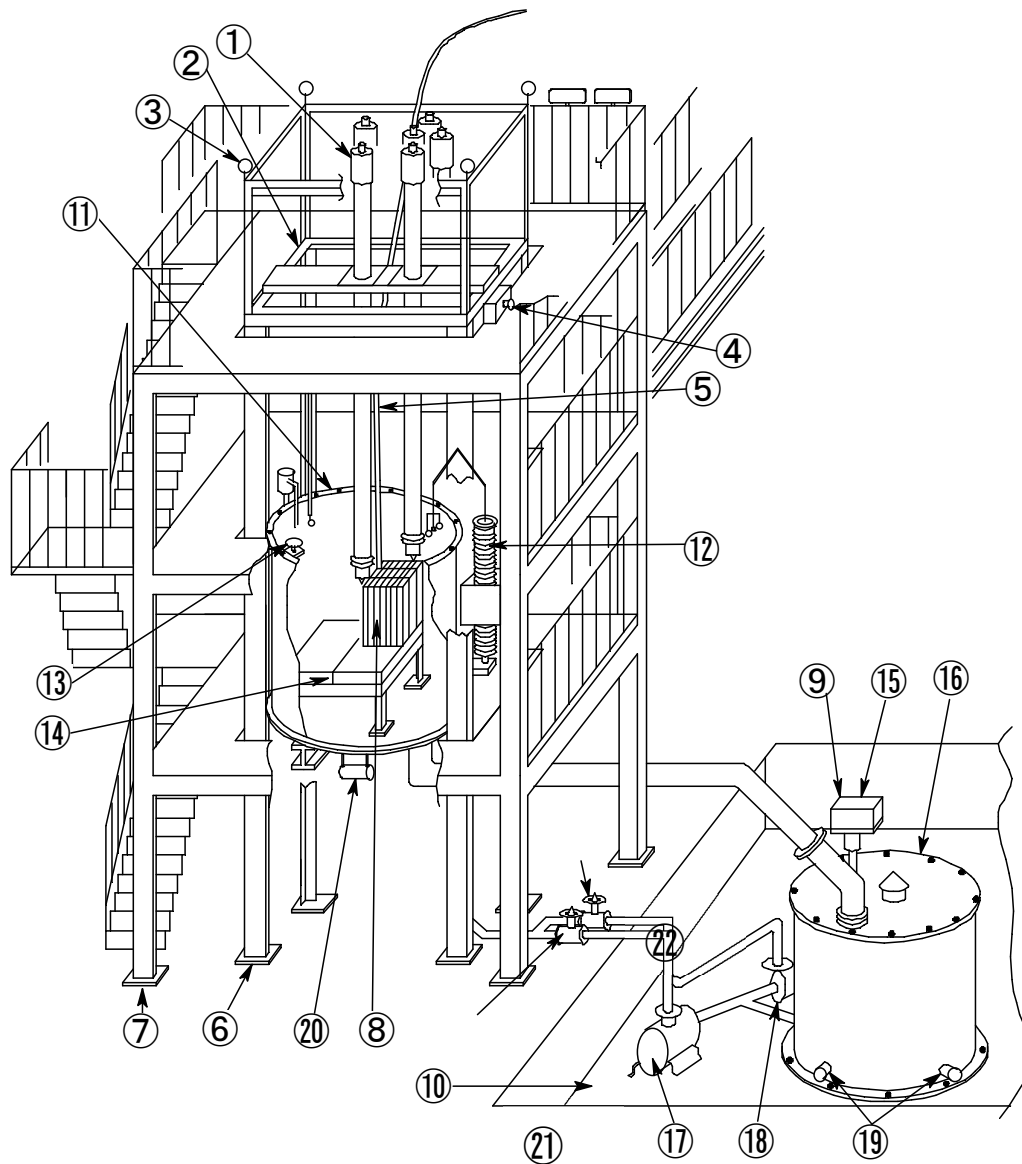


図 A-2 中心架台駆動装置



- | | | |
|--------------|-------------|------------|
| 制御棒駆動装置 | ⑨ 親子キー式ロック | ⑰ 高速給水ポンプ |
| 制御棒駆動装置固定板 | ⑩ ピット | ⑱ 低速給水ポンプ |
| クレーンつり上げ用フック | ⑪ 炉心タンク | ⑲ ダンプタンクヒー |
| ロックピン | ⑫ 溢流器 蛇腹 | ⑳ 炉心タンクヒー |
| 中性子源案内管 | ⑬ 炉心分割用ハンドル | ㉑ 高速給水弁 |
| 架台支持構造 | ⑭ 炉心分割機構 | ㉒ 低速給水弁 |
| 足場 | ⑮ ダンプ弁 | |
| 炉心 | ⑯ ダンプタンク | |

図 A-3 軽水減速炉心 概念図

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

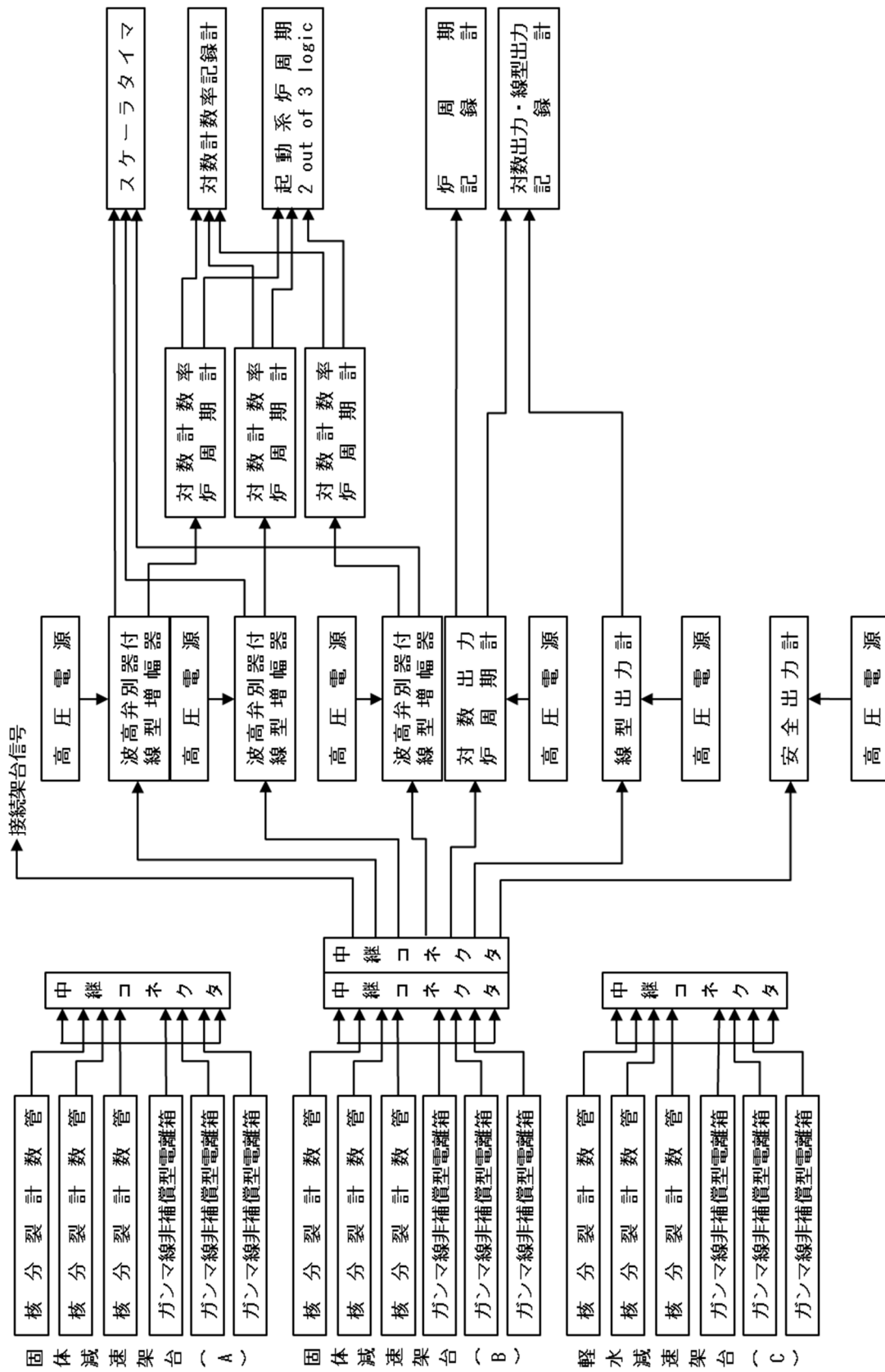


図 A-4 核計測系接続図

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

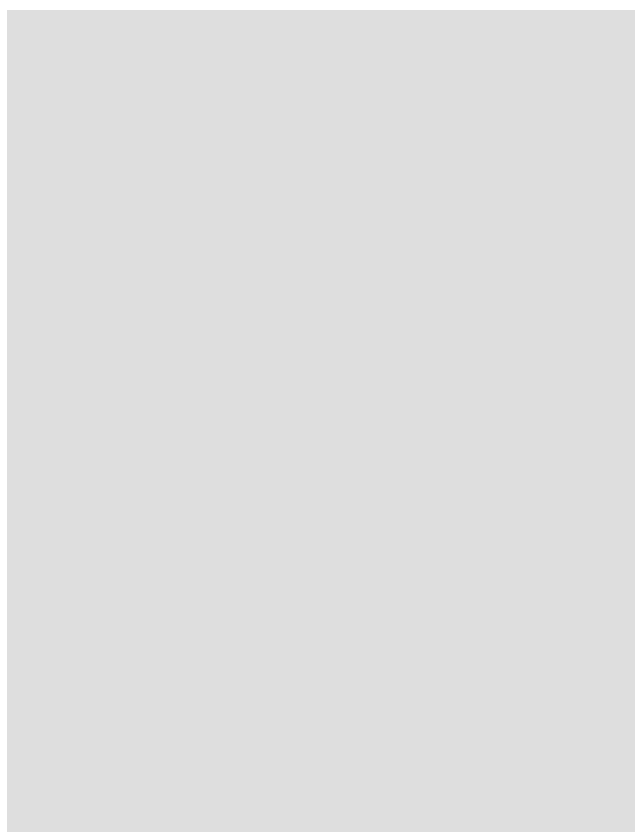


図 A-5 制御卓の線型出力計レンジ切り替えスイッチ

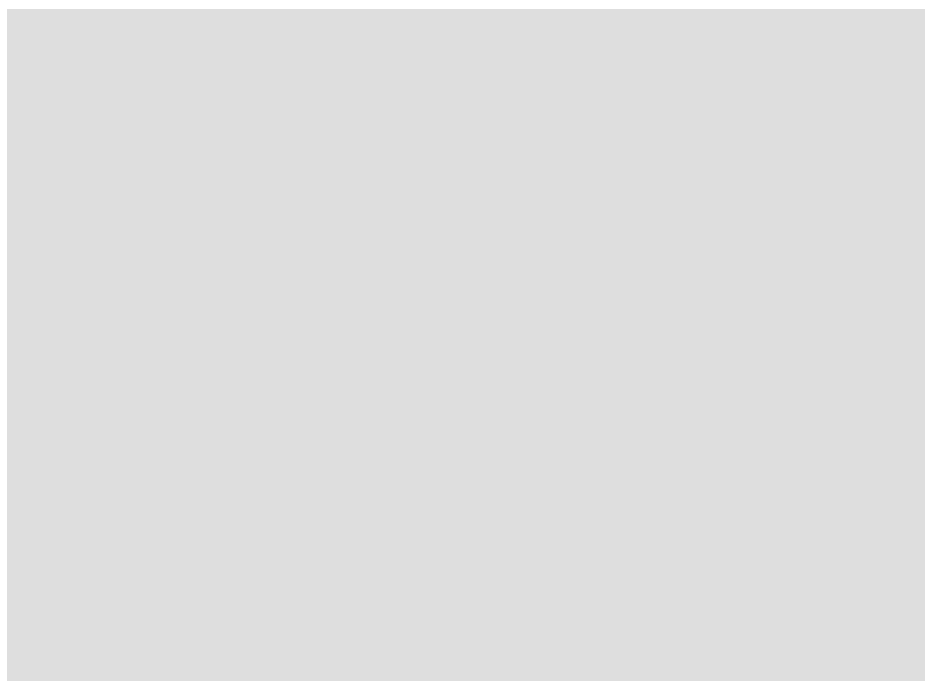


図 A-6 制御卓 線型出力計表示器

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

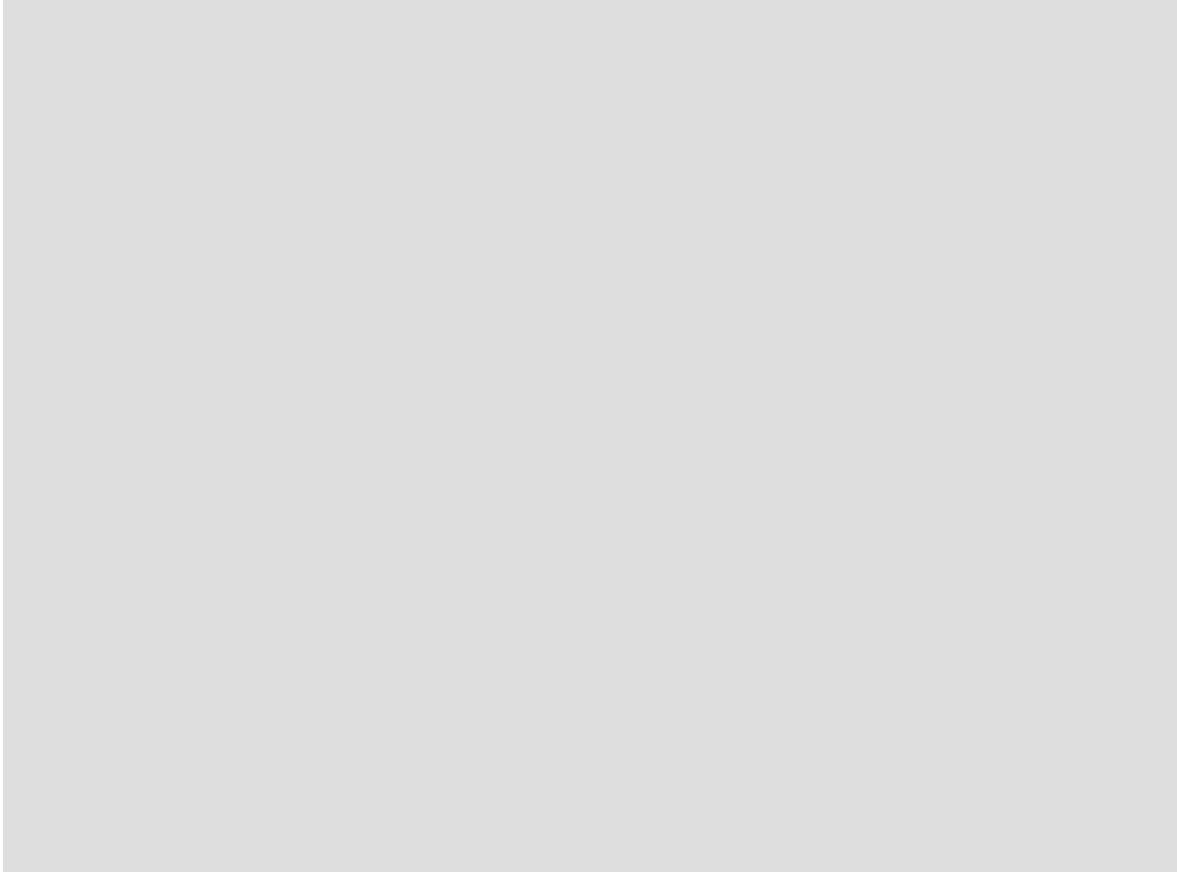


図 A-7 制御室核計装盤

表 A-1 中心架台の駆動速度

位置	ストローク (cm)	速度 (cm/s)
下限 ～ 第2段ストップ	下限 ～ 約70	3.3 以下
第2段ストップ ～ 第3段ストップ	約70 ～ 約140	1.1 以下
第3段ストップ ～ 第4段ストップ	約140 ～ 約170	0.6 以下
第4段ストップ ～ 上限	約170 ～ 約190	0.2 以下